

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Bakalářská práce

2017

Josef Janíček

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Vliv svařovacích parametrů vibračního svařování na tvorbu
svarového výronku a pevnost svarového spoje

Welding Parameters Influence for Weld Burr Formation
and Strength of Welds During Vibration Welding

Student:

Josef Janíček

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Josef Janíček**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv svařovacích parametrů vibračního svařování na tvorbu svarového
výronku a pevnost svarového spoje**
**Welding Parameters Influence for Weld Burr Formation and Strength of
Welds During Vibration Welding**
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii vlastností a použití termoplastů v automobilovém průmyslu.
2. Vypracujte literární rešerši vibračního svařování plastů.
3. Navrhněte a realizujte metodu ověřování vybraných vlastností svarových spojů.
4. Dosažené výsledky porovnejte s literárními prameny a proveďte diskuzi.

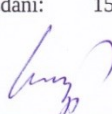
Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
LEGRAND,D.,BENDLER,J.T. *Handbook of Polycarbonate Science and Technology (Plastics
Engineering)*.Marcel Dekker Inc.2000.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 09.12.2016
Datum odevzdání: 15.05.2017


Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. 5. 2017

..... Janiček

podpis studenta

Prohlašuji že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užit (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užit dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15.5.2017

.....
Janíček
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Josef Janíček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Rovensko 289, Zábřeh 78901

Poděkování

Chci poděkovat firmě Hella Autotechnik Nova s.r.o. za umožnění zpravování bakalářské práce. Zároveň děkuji panu Ing. Martinu Kepprtovi za cenné rady při zpracování bakalářské práce a vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Vladislavu Ochodkovi, za odborné vedení, rady a připomínky.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JANÍČEK, J. Vliv svařovacích parametrů vibračního svařování na tvorbu svarového výronku a pevnost svarového spoje. Ostrava: Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2017, Bakalářská práce, 47s. Vedoucí práce: Ing. Vladislav Ochodek.

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem svařovacích parametrů vibračního svařování na tvorbu svarového výronku a pevnost svarového spoje. V práci byla provedena studie svařovaných termoplastických materiálů, svařovacích technologií a svařovacího zařízení. Experimentálně je ověřeno chování svarového výronku a pevnost svarového spoje, za vybraných svařovacích parametrů, pomocí vybraných zkoušek. Za těchto podmínek byly svařeny termoplastické díly pro automobilový průmysl a to zejména zadní skupinové svítidly.

Klíčová slova: vibrační svařování, svařování termoplastů, termoplasty

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

JANÍČEK, J. Welding Parameters Influence for Weld Burr Formation and Strength of Welds During Vibration Welding. Ostrava: Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Ostrava, 2017, 47p. Thesis head: Ing. Vladislav Ochodek.

This bachelor thesis deals with the influence of welding parameters of vibrating welding system on the formation of the weld burr and the strength of the weld joint. In this thesis was done a study of welded thermoplastic materials, welding technology and welding equipment. Experimentally is verified behavior of weld burr and strength weld joint with selected weld parameters and with selected tests. Under these conditions, thermoplastic parts were welded to the automotive industry, especially the rear group lamps.

Key words: vibration welding, thermoplastics welding, thermoplastics

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLU	10
Úvod	12
I. TEORETICKÁ ČÁST	13
1. Svařování termoplastů	13
1.1. Definice termoplastů	13
1.2. PMMA – Polymethylmetakrylát	14
1.3. PC/ABS – Palykarbonát/Akrylonitril-Butadién-Styrén	15
2. Základní způsoby svařování termoplastů	17
2.1. Svařování vyhřívaným nástrojem	17
2.2. Ultrazvukové svařování	18
3. Vibrační svařování termoplastů	20
3.1. Parametry svařování	21
3.2. Druhy svařovacích pohybů	22
3.2.1. Lineární vibrační svařování	22
3.2.2. Orbitální vibrační svařování	23
3.3. Tvary svaru	24
3.4. Linie svaru	26
II. Experimentální část	28
1. Popis vzorků a stroje Branson GVX-3HR	28
1.1. Popis testovaných vzorků	28
1.2. Popis vibrační svářečky Branson GVX-3HR	29
1.2.1. Technické údaje	29
1.2.2. Celkový pohled do stroje	31
1.2.3. Dolní nástroj	31
1.2.4. Infračervené zrcadlo	32
1.2.5. Horní nástroj	32
1.3. Svařovací parametry	33
2. Testování vzorků	33
2.1. Zkouška těsnosti	33
2.2. Destruktivní zkouška vnitřním přetlakem	34

2.3.	Výpočet hraničního tlaku	34
2.4.	Výpočet síly působící na svár	35
2.5.	Makroskopická zkouška.....	36
2.5.1.	Příprava vzorků.....	36
2.6.	Vyhodnocení destruktivní zkoušky tlakovým vzduchem	39
2.7.	Vyhodnocení makroskopických snímků	39
	Závěr	43
	Seznam použité literatury.....	44
	Seznam obrázků.....	46
	Seznam tabulek	47

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLU

Symbol/Značka	Význam	Jednotka
mm	Milimetr	[mm]
mm/sec	Milimetr za sekundu	[mm/sec]
bar	Tlak	[bar]
psi	Tlak	[psi]
mBar	Milibar	[mBar]
f	Frekvence	[Hz]
kg	Kilogram	[kg]
dB	Decibel	[dB]
kN	Kilonewton	[kN]
V	Volt	[V]
dBA	Decibel	[dB(A)]
cm ²	Centimetr čtverečný	[cm ²]
Ot/min	Otáčky za minutu	[ot/min]
W	Watt	[W]
PE	Uzemňovací vodič	[-]
PP	Polypropylen	[-]
PVC	Polyvinyl chlorid	[-]
N	Newton	[N]
CVT	Čistá vibrační technologie	[-]
kHz	Kilo Herzt	[kHz]
μm	Mikrometr	[μm]
PA6	Nylon 6	[-]
PA66	Nylon 66	[-]
PA46	Nylon 46	[-]
PBT	Polybutylen – tereftalát	[-]
PET	Polyethylen – tereftalát	[-]
TPE-E	Plyether-ester blokový Kopolymer	[-]
PC	Polykarbonát	[-]
PC+ABS	Polykarbonát/ABS	[-]

ABS	Akrylonitril Butadien Styren	[-]
HDPE	Polyethylen s vysokou hustotou	[-]
LDPE	Polyethylen s nízkou hustotou	[-]
PMMA	Akryl	[-]
POM	Acetal	[-]
PP	Polypropylen	[-]
PPS	Polyphenylen sulfid	[-]
PS	Polystyren	[-]
PVC	Polyvinyl chlorid	[-]
SAN	Styren akrylonitrid	[-]
°C	Stupeň Celsia	[°C]
UV	Ultrafialové záření	[-]
g/cm ³	Gram na centimetr krychlový	[g/cm ³]
%	Procento	[%]
nm	Nanometr	[nm]
CD	Optický datový nosič	[-]
DVD	Optický datový nosič	[-]
LCD	Displej z tekutých krystalů	[-]
3D	Trojrozmerný	[-]
σ_{\min}	Minimální smykové napětí, konstanta, která je zadána požadavky pro danou svařovací technologii (odkazuje se na normu Hella HN 20120-1)	[MPa]
l_{sv}	Délka svařovacího žebra	[cm]
A	Amplituda	[cm]
p_{lim}	Limitní tlak pro zkoušku (nejnižší tlak, kterého je nutné dosáhnout)	[mBar]
S_{ks}	Obsah plochy opsané žebrem na krycím skle (plocha na kterou působí vtlačovaný vzduch)	[mm ²]
F_{sv}	Síla působící na svar (vypočtená z tlaku při zkoušce a obsahu krycího skla)	[N]
S_{sv}	Plocha svaru	[cm ²]
P_n	Naměřený tlak zkouškou	[mBar]
Re	Mez pevnosti	[MPa]
mBar/s	Milibar za sekundu	[mBar/s]

Úvod

Plastické materiály jsou v dnešním moderním světě stále častěji využívány nejen jako konstrukční, ale i designové prvky. Termoplastické materiály nachází široké využití v elektrotechnice, stavebnictví a v neposlední řadě také v automobilovém průmyslu, a to jako zadní světlíky, sací potrubí, palubní desky a mnoho dalších komponentů. Tato práce se bude zabývat svařováním termoplastických částí zadních světlíků v automobilovém průmyslu.

Teoretická část této práce se zabývá termoplastickými materiály a jejich svařováním. V této práci budou popsány zejména dva termoplastické materiály. Polymethylmetakrylát, který se v této práci používá jako krycí sklo díky své transparentnosti a směs polykarbonát-akrylonitrilbutadiénstyren, která je využívána jako pouzdro světlíků kvůli velmi dobrým mechanickým vlastnostem. Dále bude nastíněna problematika svařování termoplastických dílů a probrány nejčastější metody jejich svařování. Mezi tyto metody bude zahrnuto ultrazvukové svařování a svařování vyhřívaným nástrojem. Po obeznámení s nejčastějšími metodami se práce zabývá dále jen vibračním svařováním termoplastických dílů. Vibrační svařování je perspektivním způsobem svařování termoplastů díky svému širokému spektru nastavení různých svařovacích parametrů a hlavně kvůli možnosti svařování velkého množství profilů. U vibračního svařování jsou důležité i pohyby, které se vykonávají při svařování a to buď lineární, nebo orbitální.

V experimentální části této bakalářské práce budou vyhodnoceny vzorky svařené pomocí vibrační svářečky Branson GVX-3HR a to za různých svařovacích parametrů. Budeme zkoumat jinou amplitudu a čas předehřevu oproti vstupním parametrům. Kvůli porovnání bude svařeno pět vzorkových sérií vždy po třech párech, pokaždé se vyrábí levá i pravá světlík zároveň. Každá série bude mít jiné svařovací parametry a z každého páru se levá světlík podrobí destrukční zkoušce tlakovým vzduchem. U této zkoušky bude vypočítán hraniční tlak a následně se s tímto tlakem budou porovnávat výsledné hodnoty ze zkoušky. Ze světlíků na pravou montovací stranu automobilu se náhodně vybere jedna, z které se vyjmou vzorky pro makroskopickou zkoušku. Po vhodné úpravě odebraných vzorků se zalijí do pryskyřice a bude se vyhodnocovat tvar a kvalita výrobku, u kterého se předpokládá rozdílné chování závislé na svařovacích parametrech.

Výsledky bakalářské práce budou aplikovány v praxi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. Svařování termoplastů

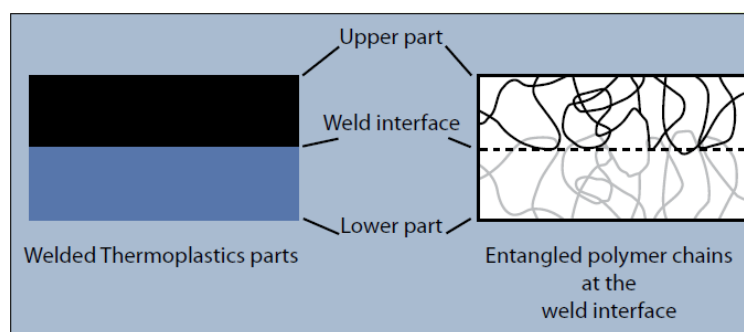
Kapitola pojednává o termoplastických materiálech, které se používají při svařování zadních skupinových svítilen.

1.1. Definice termoplastů

Termoplastické polymery se skládají z molekul, ve kterých se monomerní jednotky opakují v dlouhých řetězcích. Jako polymery se označují všechny makromolekulární látky a to jak přírodní tak syntetické. Důležitou vlastností termoplastů je schopnost se po zahřátí natavit a při následném ochlazení opět ztuhnout.

U plastů je nutné vytvořit vhodné vlastnosti přimícháním různých přísad. Při výrobě plastů jsou přísady nezbytnou složkou, která má za následek výraznou změnu mechanických, fyzických i chemických vlastností. Do výrobního procesu se zařazují přísady, jako jsou maziva a separační činidla, které mají za následek usnadnění vyjímání výrobků z forem. Dále se začleňují změkčovadla, tepelné stabilizátory, antidegradanty, světelné stabilizátory, antioxidanty, barviva a tak dále [3].

Při svařování termoplastického materiálu polymerní řetězce difundují a je vytvořena vazba zaplétáním řetězců, viz. obrázek 1. Toto platí pro všechny svařovací techniky termoplastických materiálů [2].



Obrázek 1 - Molekulární difuze [2]

Upper part – Horní díl, Weld interface – Rozhraní svaru, Lower part – Spodní díl, Welded thermoplastics parts – Svařované termoplastické díly, Entangled polymer chains at the weld interface – Zapletené polymerové řetězce

Podle chování za zvýšené teploty se plasty dělí na termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty po zahřátí měknou a postupně přechází ve viskózní taveninu, která se dá snadno zpracovávat různými technologiemi. Po ochlazení opět ztuhnou do požadovaného tvaru výrobku. Tento proces lze mnohokrát zopakovat. Oproti tomu reaktoplasty při

postupném zahřívání tvrdnou, protože vyšší teplota urychluje jejich reakci. Takový plast je již nerozpustný a netavitelný [3].

Na obrázku 2 je viditelná svařitelnost jednotlivých termoplastů.

	PA6	PA66	PA46	PBT	PET	TPE-E	PC	PC+ABS	ABS	HDPE	LDPE	PMMA	POM	PP	PPS	PS	PVC	SAN
PA6	+	+	+						+									
PA66	+	+	+						+									
PA46	+	+	+															
PBT				+	+	+	+	+	+									+
PET				+	+	+	+	+										
TPE-E				+	+	+	+	+										
PC				+	+	+	+	+	+			+			+			+
PC+ABS				+	+	+	+	+	+			+			+			+
ABS	+	+		+			+	+	+			+				+	+	+
HDPE										+								
LDPE											+							
PMMA							+	+	+			+						
POM													+					
PP														+				
PPS							+	+							+			
PS									+							+		
PVC									+								+	
SAN				+			+	+	+									+

Obrázek 2 - Svařitelnost termoplastů [2]

1.2. PMMA – Polymethylmetakrylát

Jedná se o vysoce transparentní termoplastický polymer získávaný polymerizací monomeru metylmetakrylátu. PMMA byl poprvé vyroben společností Rohm and Haas v roce 1933 [4]. První komerční výroba akrylátového bezpečnostního skla byla zahájena v roce 1936 [8]. Je to často používaná náhražka skla vzhledem k jeho průhlednosti a odolnosti proti poškrábání. Proto se běžně také používá označení jako akrylátové sklo nebo akrylát. Naopak oproti sklu je mnohem lehčí a má nižší výrobní náklady. Navzdory tomu, že se jedná o jeden z nejstarších plastů, který se v současné době používá, zůstává stále materiálem pro širokou škálu použití [8].

Jeho výroba se skládá ze dvou fází. Prvním krokem je příprava polymeru, což je viskózní roztok polymeru a monomeru. Tento prepolymer se plní do mezer mezi skla a v těchto formách pak probíhá další pomalá polymerace [7]. PMMA se zpracovává

nejčastěji při teplotách 160 až 250 °C a dají se použít všechny běžné technologie jako je vytlačování, vstřikování, tvarování a odlévání.

Vlastnosti

Mezi zásadní vlastnosti tohoto materiálu patří mimořádně dobré optické kvality. Vyznačuje se průhledností a lesklým povrchem. Má vynikající odolnost proti poškrábání a s tím související tvrdost. Tento materiál se také vyznačuje velmi dobrou odolností proti UV záření a stárnutí působením povětrnostních podmínek.

Po patřičných modifikacích jsou k dispozici také speciální typy PMMA s různými vlastnostmi, jako například matný povrch nebo úprava pro splnění požadovaných parametrů pro kontakt s potravinami.

Hustota PMMA činí 1,17 – 1,20 g/cm³, což je méně než polovina hustoty skla. Při tloušťce 3mm je světelná propustnost PMMA až 92%, to dokazuje odrazem okolo 4% svého povrchu a to díky indexu lomu 1,4914 na 587,6 nm [8]. PMMA se dále vyznačuje velkou odolností proti roztokům solí, střední odolností proti kyselinám, zásadám a vodě. Nemá moc dobrou odolnost proti oxidačním činidlům a sklon ke korozi za napětí při působení rozpouštědel [3].

Při identifikaci nám pomůže to, že neplave ve vodě a není odolný proti hoření. Při hoření produkuje zápach podobný česneku, který je doprovázený praskavým zvukem a namodralou až modrou barvou ohně. Na lomové zkoušce se vyznačuje křehkým lomem [3].

Druhy použití

Jak již bylo zmíněno, díky vynikající průhlednosti PMMA je ideální náhražkou skla, zvláště tam, kde jsou kladeny nároky na nízkou hmotnost, nebo jsou zde kladeny nároky na pevnost. Kromě toho je PMMA kompatibilní s lidskou tkání a může tak být užitečným materiálem pro protézy a transplantace, zubní protézy, optické čočky, a další. [8].

Své uplatnění PMMA nachází i ve stavebnictví kde se používá pro venkovní i vnitřní osvětlení, ale také v solárních kolektorech. Na PMMA lze narazit i při každodenním životě v podobě knoflíků, vlasových spon, různých kuchyňských nádob nebo při použití na optická média (CD, DVD) [8]. V neposlední řadě se také používá u LCD displejů a na světla automobilů.

1.3. PC/ABS – Polykarbonát/Akrylonitril-Butadién-Styrén

Jedná se o směs PC (Polykarbonát) a ABS (akrylonitril-butadién-styrén) poskytující velmi dobrou zpracovatelnost ABS a velmi dobré mechanické vlastnosti proti nárazu

a teple, které jsou typické pro PC [10]. ABS se v této sloučenině zaslouhuje za dobrou tvarovatelnost, lepší rázovou houževnatost při nízkých teplotách a schopnost být pokovován. Kromě těchto vlastností se PC/ABS vyznačuje tepelnou stabilitou a dobrou odolností proti povětrnostním vlivům, za velmi dobrou vlastnost je považována nehořlavost, což je velké pozitivum nejen v automobilovém průmyslu [11].



Obrázek 3 – Struktura PC/ABS [10]

Vlastnosti

Jednou z nejvýznamnějších vlastností je výborná tepelná stabilita a velmi dobrá rázová pevnost v porovnání s ostatními technickými plasty. Toto má za následek jeho uplatnění v konstrukčních materiálech a jiných vnějších částí. PC/ABS má v širokém rozsahu teplot vynikající mechanickou pevnost, tato vlastnost je vhodná, když je požadovaná tepelná odolnost a to jak za studena, tak za tepla [11]. Mezi další důležité vlastnosti patří snadné obrobení, a schopnost barvení a potisku. Polymer PC/ABS se hodí pro aplikace vyžadující vysokou teplotu průhybu při zatížení materiálu (95 – 125°C) a dobrou tuhost a pevnost. Vyváženost vlastností PC/ABS se odvíjí od poměru PC a ABS ve směsi [10]. Tento poměr ovlivňuje především tepelnou odolnost finálního produktu.

Chemická odolnost PC/ABS je stabilní ve vodě, alkoholu, oleji a soli, ale může se zdeformovat nebo prasknout, popřípadě úplně roztavit při vystavení alkalickým a chlorovodíkovým uhlovodíkům. Mohou vznikat i komplikace v životním prostředí při ohoření tohoto materiálu. Problémy způsobují látky, které zabraňují hoření, při jejichž spalování vznikají toxické látky.

Odolnost vůči povětrnostním vlivům je dobrá. Vykazuje pouze velmi malou změnu mechanických vlastností a velmi malou změnu barvy při vystavení slunečnímu záření. [11]

Druhy použití

Tento materiál se typicky používá v automobilovém průmyslu jako nosné konzole, odkládací schránky, přístrojové panely, konstrukční díly a také vyfukovaná zadní čela

sedaček. Další využití nachází i v elektronice na příklad v rámech televizorů, klávesnice, adaptéry a dobíječky a mimo jiné těla mobilních telefonů [10]. V poslední době se PC/ABS také začíná hojně používat jako tiskařský materiál při 3D tisku.

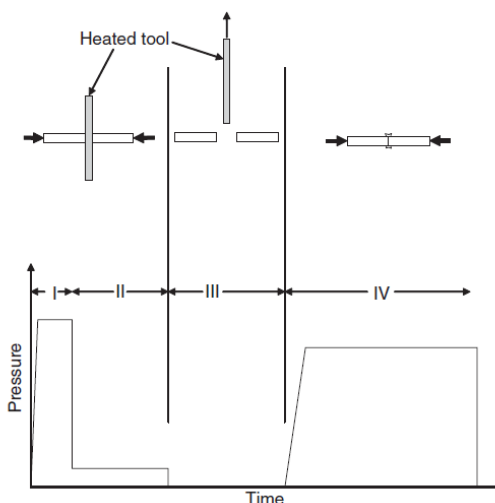
2. Základní způsoby svařování termoplastů

V kapitole budou popsány základní způsoby svařování termoplastů, jako je svařování vyhřívaným nástrojem a ultrazvukové svařování.

2.1. Svařování vyhřívaným nástrojem

Svařování vyhřívaným nástrojem je široce používána metoda pro svařování vytlačovaných profilů nebo komponentů vytvořených pomocí vstřikování.

Tento svařovací proces využívá vyhřívanou kovovou desku, která teplem nataví stykové plochy jednotlivých termoplastických dílů, které jsou na nástroj přitlačovány tlakem. V důsledku natavení dílů při svařování se odstraňují povrchové nedokonalosti a na společném rozhraní se vytvoří hladké hrany. Jakmile jsou spojované materiály dostatečně natavené, odstraní se vyhřívané těleso a spojované díly jsou spojeny pod tlakem [1].



Obrázek 4 – Průběh svařování horkým nástrojem [1]

Heated tool – Vyhřívaný nástroj, Pressure – Tlak, Time – Čas

Tlakové svařování vyhřívaným nástrojem se dělí na čtyři fáze viditelné na obrázku 4. První fáze je natavení spojovaných součástí způsobem, jak je již popsáno výše. V druhé fázi se snižuje tlak, kterým jsou přitlačovány svařované komponenty na vyhřívanou desku. Při dosažení potřebného natavení nastává třetí fáze, kde je ohřívací těleso odstraněno. Tato fáze musí být co nejkratší, ideálně pod 3 sekundy, aby se zabránilo předčasnému

ochlazení materiálu. Ve čtvrté fázi jsou díly spojeny podtlakem, který způsobí proudění taveniny směrem ven ze svaru. V průběhu této fáze je nutné dodržovat tlak po dobu chlazení, aby se zabránilo deformaci. [1]

Svařování tlakem požaduje, aby zařízení, ve kterém se svařuje, umožňovalo přesné nastavení tlaku. Nevýhodou této metody je, že konečné rozměry součástí nelze přímo ovládat. Různé tloušťky v tavenině, jiná citlivost a viskozita taveniny termoplastů, malé změny teploty mohou mít za následek nepřijatelné rozdíly v rozměrech konečných součástí [1].

2.2. Ultrazvukové svařování

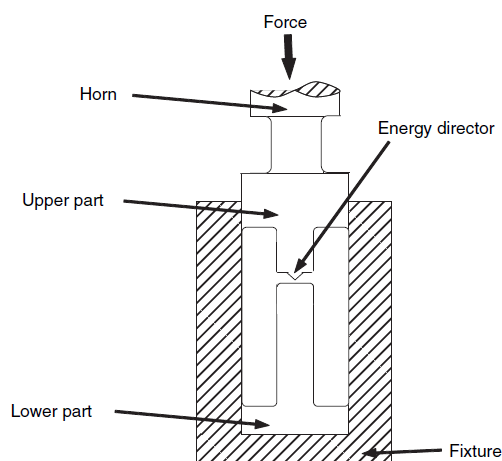
Ultrazvukové svařování je jedna z nejrozšířenějších metod svařování termoplastů. Využívá ultrazvukovou energii při vysokých frekvencích (20 až 40 kHz) a nízké amplitudy (1 – 25 μm) vznikají mechanické vibrace. Takto produkované vibrace generují teplo na společném rozhraní částí, které jsou spojovány, což má za následek tavení termoplastů a vytvoření spoje. Ultrazvuková technika svařování je nejrychlejší známá svařovací technika, s typickou délkou svařování mezi 0,1 až 1 sekunda [1].

Kromě běžného svařování se tato metoda používá i pro procesy jako je vkládání kovových dílů do plastických dílů.

Pokud je termoplastický materiál vystaven působení ultrazvukových vibrací, je v materiálu generované stojaté sinusové vlnění. Část tohoto vlnění je rozptýlena v mezimolekulárním tření, to vede k hromadění tepla v základním materiálu, a část je přenesena na společné rozhraní, kde způsobuje lokální natavení. Ideální přenos ultrazvukové energie je proto závislý na tvaru dílu a také na absorpčních vlastnostech materiálu.

Čím blíže ke spoji se nachází zdroj vibrací, tím se na spoji ztrácí pomocí absorpce menší energie. Pokud je vzdálenost od zdroje ke spoji menší, než 6,4 mm je proces označován jako near-field (blízko oblastní) svařování. Tento druh svařování se používá pro materiály s nízkou tuhostí, tudíž ty, které mají vysokou absorpci energie. Pokud je vzdálenost od zdroje ke spoji větší, než 6,4 mm je proces označován jako far-field (daleko oblastní) svařování [1]. Tohoto druhu svařování se využívá při svařování materiálů o vysoké tuhosti, které mají velmi nízkou úroveň absorpce ultrazvukové energie.

Generované teplo je obvykle nejvyšší na povrchu spoje v důsledku povrchových nerovností. Proto při použití ultrazvukového svařování se často vyskytuje trojúhelníkový tvarový výstupek, nazývaný jako koncentrátor energie.

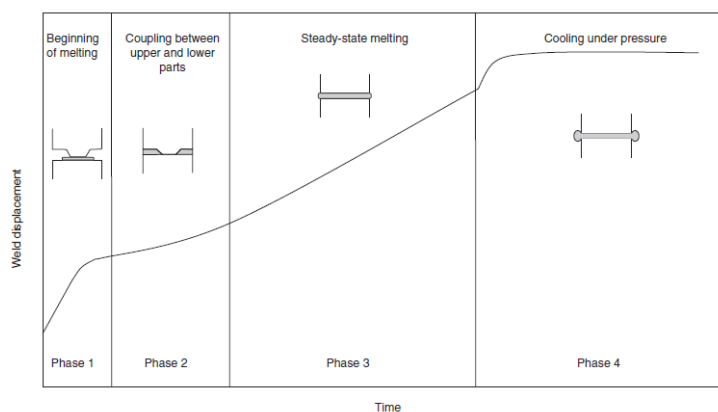


Obrázek 5 – Ultrazvukové svařování za použití koncentrátoru energie [1]

Force – Síla, Horn – Roh, Upper part – Horní část, Energy director – Koncentrátor energie, Lower part – Spodní část, Fixture – Upnutí

Při svařování jsou vibrace kolmé k spojované ploše a koncentrátor energie je v kontaktu s druhým svařovaným dílem, viz. obrázek 5.

V tomto bodě dochází k největšímu vzniku tepla, dále dochází k roztavení koncentrátoru energie a vlévá se do spoje během první fáze svařovacího procesu. Přiblížení při snížení vzdálenosti mezi jednotlivými částmi, které vzniká v důsledku natavení koncentrátoru napětí, rychle stoupá a pak se zpomaluje v závislosti na kontaktní části koncentrátoru. V druhé fázi se části ploch setkají a míra natavení se zvyšuje.



Obrázek 6 – Fáze ultrazvukového svařování [1]

Weld displacement – Posunutí svařování, Time – Čas, Phase 1 – Fáze 1, Beginning of melting – Začátek tání, Phase 2 – Fáze 2, Coupling between upper and lower parts – Spojení horní a spodní části, Phase 3 – Fáze 3, Steady-state melting – Ustálený stav tání, Phase 4 – Fáze 4, Cooling under pressure – Ochlazování pod tlakem

Dosažení ustáleného stavu tání je ve třetí fázi. Kde vzniká konstantní vrstva taveniny a je zde doprovázena konstantním rozdělením teplot [1]. Po uplynutí určitého času nebo dosažení požadované vzdálenosti je zdroj vypnut a tím se ukončí ultrazvukové vibrace. Ve čtvrté fázi stále působí tlak, který pokud je to nutné, vytlačí přebytek taveniny. Při

tomto kroku probíhá i ochlazování a vzniká svar. Průběh svařování je viditelný na obrázku 6.

3. Vibrační svařování termoplastů

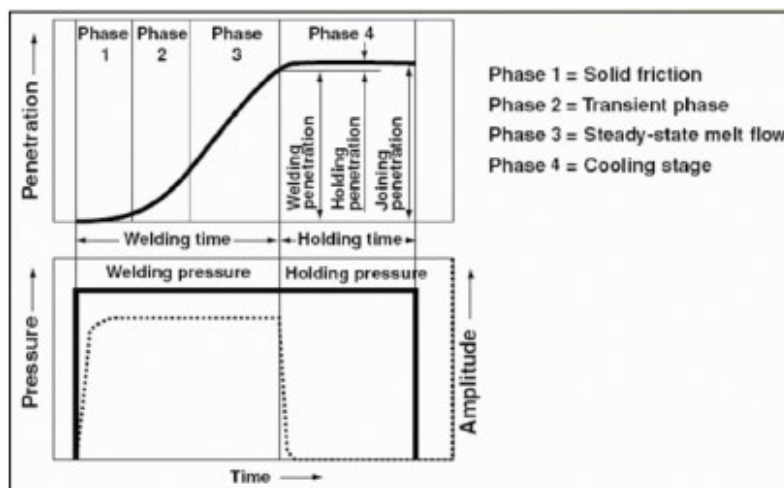
Princip fází svařování

U vibračního svařování vzniká při vzájemném kontaktu dvou plastových dílů za určité frekvence, amplitudy a tlaku tření. V důsledku tohoto tření mezi oběma částmi vzniká teplo, které způsobuje, že polymer začne tát. Kvůli tlaku proudí roztavený polymer z tavné zóny a tím vzniká výronek, viz. obrázek 7.



Obrázek 7 – Tvorba spoje [2]

Po zastavení vibrací vzniká spoj v důsledku tuhnutí taveniny. Při vibračním svařování lze odlišit čtyři různé etapy. Etapa pevného tření, přechodná rozpustná, ustalovací a etapa chlazení, viz. obrázek 8.



Obrázek 8 – Průběh etap svařování [2]

Pressure – Tlak, Penetration – Průnik, Phase 1 – Fáze 1, Phase 2 – Fáze 2, Phase 3 – Fáze 3, Phase 4 – Fáze 4, Welding time – Svařovací čas, Holding time – Čas držení, Welding pressure – Svařovací tlak, Holding time – Tlak držení, Time – Čas, Amplitude – Amplituda, Welding penetration – Svařovací průnik, Holding penetration – Přidržovací průnik, Joining penetration – Spojovací průnik, Phase 1 = Solid friction – Fáze 1 = Etapa pevného tření, Phase 2 = Transient phase – Fáze 2 = Přechodná etapa, Phase 3 = Steady-state melt flow – Fáze 3 = Rovnovážný stav toku taveniny, Phase 4 = Cooling stage – Fáze 4 = Etapa chlazení

V pevné třecí fázi se vytváří teplo v důsledku tření mezi oběma plochama. Toto tření způsobí, že se materiál začíná zahřívat až do bodu, kdy je dosaženo tání materiálu. Teplo vznikající třením závisí na vlastnostech svařovaného materiálu a na parametrech svařování frekvence, amplitudy a tlaku.

U druhé, přechodové, fáze dochází k roztavení svařovaného materiálu. V důsledku vířivého ohřevu. V tavenině klesá ohřev a tloušťka taveniny se zvyšuje [2].

Při rovnovážném stavu toku taveniny se rychlost tavení rovná rychlosti průtokové. Jakmile je této fáze dosaženo, tloušťka roztaveného materiálu se stává konstantní vrstvou. V rovnovážném stavu je takto udržována až do doby, kdy je dosaženo požadované hloubky průvaru, při které se zastaví vibrace.

Po zastavení vibrací se tekutý polymer ochlazuje. Tím začíná poslední, čtvrtá, etapa chladnutí. Svařované díly tuhnou pod tlakem a to je důležité zejména z důvodu, aby bylo dosaženo stejnoměrného spojení dílů. V průběhu chladnutí tavenina tvrdne, po úplném vyhlazení se ze svařovaných částí stává trvalé spojení.

3.1. Parametry svařování

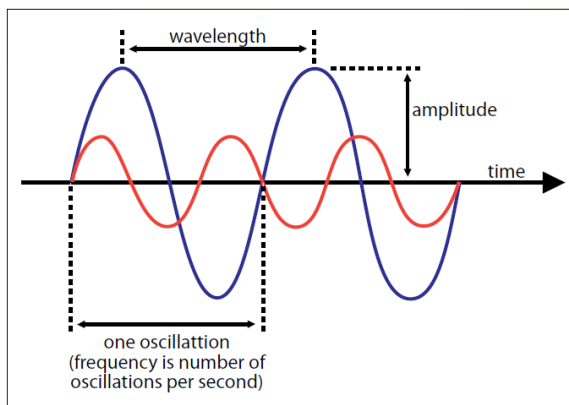
Vibrační svařování se nejčastěji používá na velké díly, menší součásti lze svařovat ekonomičtěji tak, že jsou rozloženy v dutině nástroje. Tato skutečnost znamená, že je možné svařovat více součástí najednou. Nejdůležitějšími parametry procesu vibračního svařování jsou frekvence, amplituda, tlak, čas a hloubka [2]. Při optimalizovaných podmínkách lze dosáhnout vysoké pevnosti svaru, avšak optimální nastavení svařovacích parametrů závisí například na druhu polymeru, geometrii a požadavků na čistotu.

Frekvence

Většina průmyslových vibračních svařecích strojů pracuje při frekvenci 100 – 240 Hz, stroje s vyšší frekvencí jsou také k dispozici [2]. Frekvence závisí i na hmotnosti horního nástroje.

Amplituda

Nižší svařovací amplitudy (0,7 – 1,8 mm) se používají společně s vyšší frekvencí (240 Hz) a při použití vysoké amplitudy (2 – 4 mm) se používají nižší frekvence (100 Hz) [2]. Při vysoké amplitudě se zkracuje čas svařování, to má ale negativní vliv na čistotu svaru. Amplituda není celkový rozkmit, ale pouze jeho polovina, viz. obrázek 9.



Obrázek 9 – Amplituda [2]

Wavelength – Vlnová délka, Amplitude – Amplituda, Time – Čas, One oscillation (frequency is number of oscillations per second) – Kmitočet (počet kmitů za sekundu)

Tlak

Svařovací tlak je značně rozdílný (0,5 – 20 MPa), přesto se používají tlaky v dolní hranici (0,5 – 2 MPa) [2]. S vyšším tlakem se snižuje doba svařování, ale zvyšující se tlak má negativní vliv na pevnost svaru. A to z důvodu, že vysoký tlak vytlačuje taveninu ven ze svaru.

Čas

Vibrační svařování se řídí buď časem nebo hloubkou. Při svařování se čas svařování pohybuje mezi dvěma až deseti sekundami v závislosti na ostatních parametrech svařování.

Hloubka

Hloubka je při vibračním svařování nejdůležitějším faktorem. V zařízení kde se dá hloubka řídit je čas variabilní. Když je nastavován čas znamená to, že je hloubka proměnlivá. Obecně platí, že ovládání hloubky svaru je výhodnější.

3.2. Druhy svařovacích pohybů

Druhy svařovacích pohybů jsou rozděleny na dva hlavní pohyby, lineární a orbitální vibrační svařování.

3.2.1. Lineární vibrační svařování

Při lineárním vibračním svařování jsou svařované materiály uloženy ve vzájemném kontaktu a zatížené tlakem. Vnější síla ve formě vibrací je následně aplikována tak, aby došlo k vzájemnému pohybu mezi svařovanými součástmi. Jeho směr je kolmý na směr tlakového zatížení. Součásti kmitají s relativně malou amplitudou výchylky, typický je

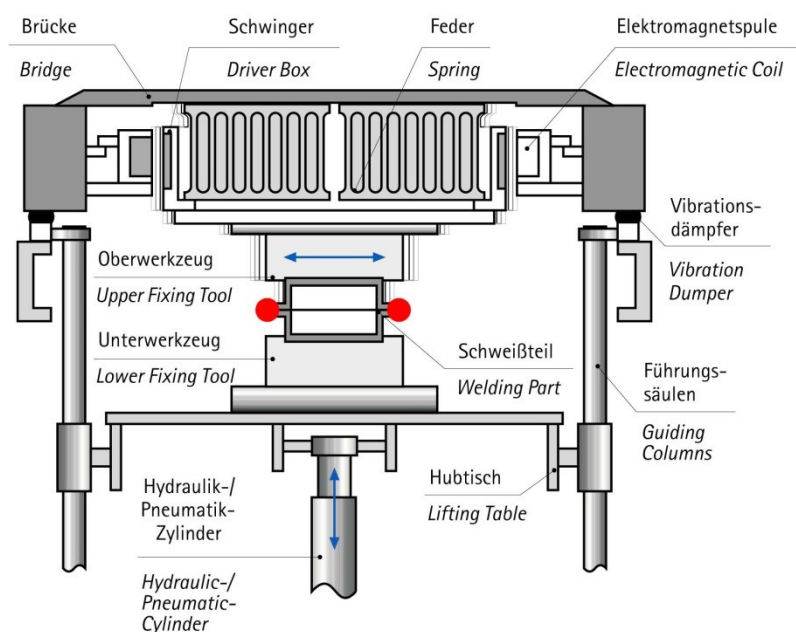
rozměr 0,9 mm při frekvenci kmitání 240 Hz (vysoká frekvence), nebo 2 mm při 100 Hz (nízká frekvence), v rovině spojení.

Typická doba svařování je 2 až 10 sekund. V konečném důsledku tvoří celkový čas cyklu 20 až 45 sekund včetně manipulace a strojních přesunů. [5]

Svařování lineárním kmitáním je velmi často používanou metodou v automobilovém průmyslu. Pomocí této technologie se dají svařovat palubní desky, plastové sací potrubí a v neposlední řadě také zadní světlý automobilů.

Lineární třecí svařování vyžaduje komplexnější strojní vybavení v porovnání s ostatními technikami jako je např. orbitální svařování. Výhodu má v tom, že umožňuje spojování součástek téměř jakéhokoliv tvaru [5].

Na obrázku 10 je schematicky znázorněné lineární vibrační svařování.



Obrázek 10 – Schéma lineárního svařování [5]

Bridge – Přemostění, Driver box – Řídící jednotka, Spring – Pružina, Electromagnetic coil – Elektromagnetická cívka, Vibration dumper – Tlumič vibrací, Guiding columns – Vodicí sloupky, Lifting table – Zvedací stůl, Hydraulic-/Pneumatic-Cylinder – Hydraulický/Pneumatický píst, Lower fixing tool – Spodní upínací nástroj, Upper fixing tool – Horní upínací nástroj, Welding part – Svařovaná součást

3.2.2. Orbitální vibrační svařování

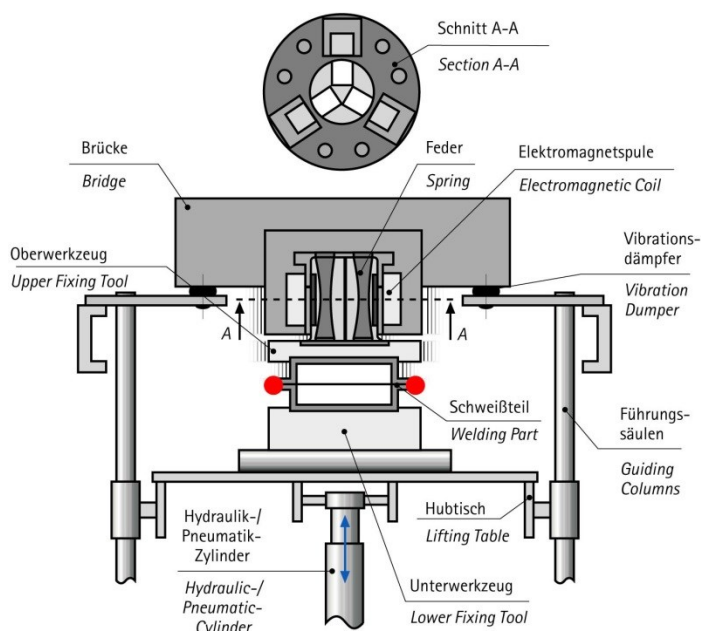
V případě orbitálního vibračního svařování jsou svařované materiály uloženy do vzájemného kontaktu a zatížené tlakem. Vnější síla ve formě vibrací je aplikována tak, aby vzájemný pohyb mezi svařovanými součástmi byl kolmý na směr tlakového zatížení. Součásti kmitají s relativně malou amplitudou výchylky typicky je to 0,75 mm při frekvenci kmitání 200 Hz v rovině spojení.

Typická doba svařování je 2 až 8 sekund, což v konečném důsledku tvoří celkový čas cyklu 20 až 40 sekund včetně manipulace a strojních přesunů [6].

Svařování orbitálními vibracemi je stejně jako svařování pomocí lineárních vibrací používané v automobilovém průmyslu. Svoje využití nachází při výrobě např. ventilátorů a elektronické skřínky.

Třecí svařování kmitáním po dráze – orbitální vyžaduje komplexnější stroje v porovnání s ostatními technikami např. svařování pomocí rotace, ale jeho výhoda je v tom, že umožňuje spojování součástek takřka jakéhokoliv tvaru, pokud je oblast svaru plochá [6].

Schématické znázornění orbitálního vibračního svařování, viz. obrázek 11.



Obrázek 11 – Schéma orbitálního svařování [6]

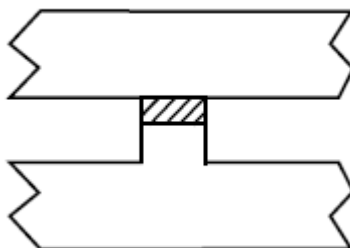
Bridge – Přemostění, Spring – Pružina, Electromagnetic coil – Elektromagnetická cívka, Vibration dumper – Tlumič vibrací, Guiding columns – Vodící sloupky, Lifting table – Zvedací stůl, Hydraulic-/Pneumatic-Cylinder – Hydraulický/Pneumatický píst, Lower fixing tool – Spodní upínací nástroj, Upper fixing tool – Horní upínací nástroj, Welding part – Svařovaná součást, Section A-A – Řez A-A (Orbitální hlava)

3.3. Tvary svaru

Tvary a plochy svarových spojů mají rozhodující vliv na kvalitu svaru. Právě z těchto důvodů je velmi důležité, aby svary byly navrhovány s ohledem na optimální koncové vlastnosti. Návrh spoje závisí především na požadavcích a návrhu součásti [2]. Mezi základní požadavky na svarový spoj patří mechanická pevnost a také těsnost proti vodě, nebo jiným médiím. Dalším důležitým požadavkem je vizuální vzhled konečného svaru.

Tupý spoj

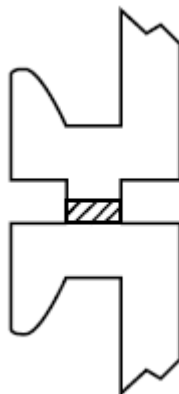
Jedná se o nejjednodušší spoj, který je využíván při svařování krátkých stěn, nebo stěn, které jsou rovnoběžné s vibračním pohybem. Aby se zabránilo nárazům styčných ploch musí se zabránit tomu, aby byly úplně mimo kontakt. Je tomu dosaženo tak, že je omezena amplituda na 90% tloušťky stěny [2].



Obrázek 12 – Tupý spoj [2]

Tupý spoj s U drážkou

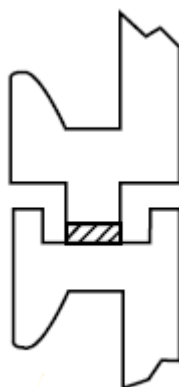
U drážka se používá v případech, kde jsou tenké a dlouho nepodpořené stěny. Je navržen tak, aby zámkový svarový spoj šel uchytit do přípravků nástroje, čímž se zabránilo ohybu stěny. Tímto způsobem je možné úspěšně svařit i dlouhé stěny nebo stěny malé tloušťky až 0,8 mm [2].



Obrázek 13 – Tupý spoj s U drážkou [2]

Spoj pero s U drážkou

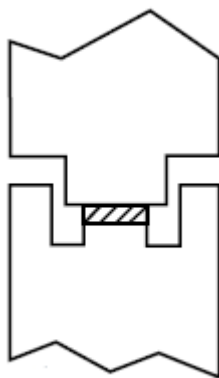
Drážka drží bezpečně v nástroji, který před svařováním navzájem vyrovná dosedací plochy. Svařovací síla se aplikuje přímo na svařovanou část. Na jedné ze svařovaných součástí se nachází jazýček, který se v průběhu svařování roztavuje a tím vyplní drážku. Z tohoto důvodu je nutné, aby byla drážka přesně dimenzována na objem taveniny [2].



Obrázek 14 – Spoj pero s U drážkou [2]

Spoj dvojité pero s U drážkou

Tento spoj je srovnatelný se spojem s perem s U drážkou, ale je speciálně konstruován k zajištění maximální pevnosti. Tento svar má nejčistší vzhled součástí. [2]

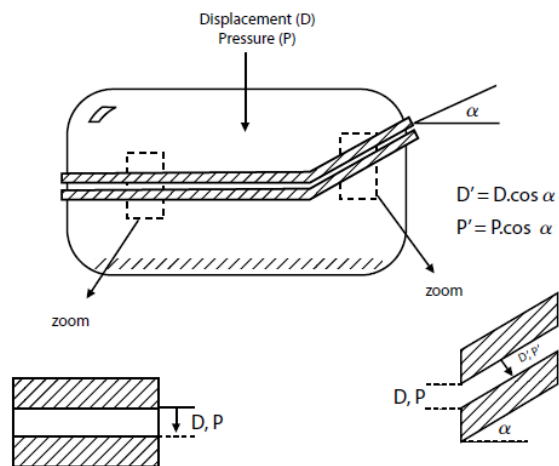


Obrázek 15 – Spoj dvojité pero s U drážkou [2]

3.4. Linie svaru

Navrhování linie svaru je nejnáročnějším úkonem při navrhování svařování pomocí vibrací. Při dimenzování svařovací linie je nutno zohlednit upínací osu, která by měla být paralelně nebo přibližně rovnoběžná s osou svaru. Další doporučení se týká dělicí čáry, kterou má být jedno nebo dvou rozměrná křivka, promítnutá do roviny rovnoběžně s upínací osou a kolmo k ose amplitudy. Obecně platí, že je jednodušší pracovat s rovinnou plochou než zakřivenou. Vzhledem k vysokým vibracím je možné mít linii svaru nakloněnou v ose vibrací, avšak nesmí přesáhnout úhel více než 10° . Omezení může nastat při přítomnosti činníka vázající na sebe svarovou housenku proti svařovací rovině. Penetrační hloubka a účinný tlak je na šikmé svařovací rovině nižší, viz. obrázek 16. Úhel mezi svařovacími liniemi je omezen na maximálně 60° (pro sací potrubí a škrťací klapky

muže být limit zvýšen na 70°). Pro dosažení požadované pevnosti svaru při nakloněné rovině je potřeba zvýšit nastavení požadovaných hodnot [2].



Obrázek 16 – Šikmá svarová rovina [2]

Displacement – Posunutí, Pressure – Tlak, zoom – zvětšení

II. Experimentální část

1. Popis vzorků a stroje Branson GVX-3HR

Kapitola pojednává o vibrační svářečce Branson GVX-3HR a o výrobě vzorků.

1.1. Popis testovaných vzorků

Vzorky, které byly vyrobeny ve společnosti HELLA AUTOTECHNIK NOVA s.r.o. se sídlem v Mohelnici se montují na automobil Audi. Pro zkoušky byly svařeny vzorky s rozdílnými parametry při svařování.

Jedná se o zadní světlonu, viz. obrázek 17, kterou můžeme rozdělit na dvě hlavní části a to zadní část, tzv. pouzdro, vyrobenou z neprůhledného materiálu PC-ABS a krycí části světlony z PMMA, která je transparentní. Obě části světlony jsou vyráběny vstřikováním a to tak, že v každém vstřikovacím kroku je vyroben jeden pár světlů.

Základní materiál pro výrobu pomocí vstřikování je ve formě granulátu. Granulát je nejprve vysušen v násypce a poté pomocí šnekového dopravníku přesunut do plastifikační jednotky, kde se nahřeje na teplotu, která je požadována pro vstřikování. Následně je vstřikován do forem.



Obrázek 17 – Vzorek zadní světlony

1.2. Popis vibrační svářečky Branson GVX-3HR

Svářecí stroj Branson GVX-3HR, obrázek 18, je určen pro svařování termoplastických plastových dílů, jako jsou zadní světlíny automobilů nebo i palivové nádrže motorových pil. Na daném svářecím stroji je zakázáno svařovat netermoplastické plasty, kovy ani materiály, které by mohly být zdravý škodlivé, obsahující kyseliny nebo výbušné látky.



Obrázek 18 – Vibrační svářečka Branson GVX-3HR [16]

1.2.1. Technické údaje

V tabulce 1 jsou uvedeny parametry vibrační svářečky Branson GVX-3HR.

Tabulka 1 – Technické údaje stroje [9]

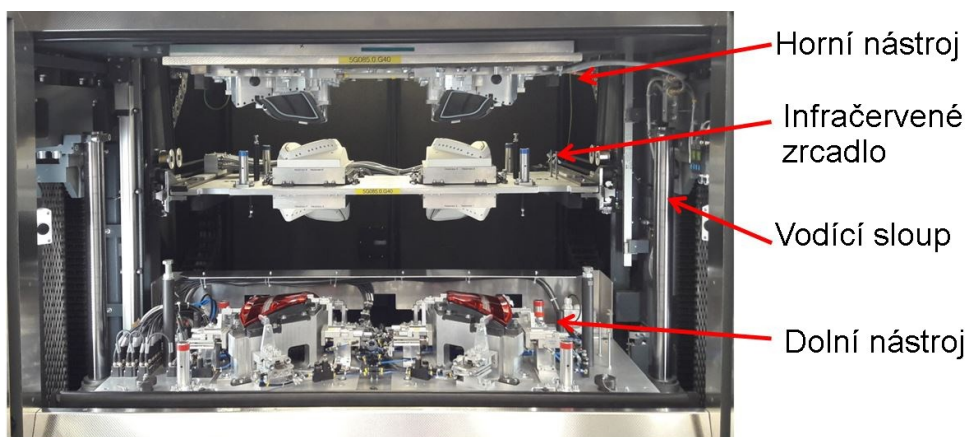
Technické specifikace	Jednotky	GVX-3HR
Celkové rozměry (V x Š x H)	mm	2338 x 2741 x 1305 (2273 CVT)
Vibrační hlava		
Model svařovací hlavy		M-624H
Frekvence (nominální, závisí na hmotnosti nástroje)	Hz	210-250 Hz
Amplituda Vzdálenost mezi maximálními hodnotami	mm	0,7 – 1,8
Hmotnost nástroje	kg	35 – 65
Kapacita svařovací oblasti (test mat'l PP, závisí na upínací síle a amplitudě)	cm ²	500
Povrchy nástrojů a rozměry krytu		
Rozměry montážního prostoru a horního nástroje (montážní povrch svařovací hlavy: Š x H x vzdálenost od podlahy)	mm	920 x 540 x 1710
Montážní povrch dolního nástroje (povrch zvedacího stolu: Š x H x vzdálenost od podlahy)		1360 x 600 x 860

Jistič zvedacího stolu vystředění na horní straně stolu (Š x H)		800 x 300
Vzdálenost mezi hřídelemi stolu (zleva doprava)		1450
Maximální vzdálenost mezi povrchy dolního a horního nástroje (zvedací stůl v krajní dolní poloze: „výška otevření“)		850
Minimální vzdálenost mezi povrchy dolního a horního nástroje (zvedací stůl v krajní horní poloze: „výška zavření“)		250
Zdvih zvedacího stolu		600
Pohyb zvedacího stolu / upínací síla		
Způsob přepravy zvedacího stolu		Servo motor; převodovka; mechanismus hnacího řetězu
Rychlost zvedacího stolu	mm/sec	0-500
Rozsah upínací síly	kN	1-25
Zvuková izolace		
Emise hluku (EN ISO 11202)	dBA	Maximální časový průměr 76,9 dB(A)
Přední dveře (V x Š x vzdálenost od podlahy)	mm	820 x 1400 x 940
Zadní dveře (rozměry vnitřního otvoru V x Š)	mm	1850 x 1410 (odpovídají standardu dvojitých dveří; dveře se otevírají k podlaze)
Ovládací prvky stroje		
Logistika stroje/interní komunikace		Řídicí systém Branson Logic Control Systém Architektura sběrnice CanOpen pro vnitřní funkce stroje (ovladače, V/V)
Prostředí uživatelského rozhraní		Průmyslový počítač 12palcová barevná kapacitní dotyková obrazovka Rozlišení obrazovky 1024 x 768 Rozhraní Branson Interface Systém
Prvky pneumatického systému pro standartní vybavení		
Značky standartních součástí		Zákaznické preference mimo seznam standartního vybavení: <ul style="list-style-type: none"> • Asco Numatics (výchozí standart) • SMC • Festo
Vstupní tlak vzduchu	bar	6-10 (80-140 psi)
Přípojky		
Pneumatická servisní linka (nominální průměr)		½ palce

Napájení		Zákaznické preference mimo seznam standardního vybavení: <ul style="list-style-type: none"> • 3 x 440 V stř., 50 Hz, PE, bez N • 3 x 440 V stř., 60 Hz, PE, bez N • 3 x 220 V stř., 50/60 Hz, PE, bez N • 3 x 415 V stř., 50 Hz, PE, N
----------	--	--

1.2.2. Celkový pohled do stroje

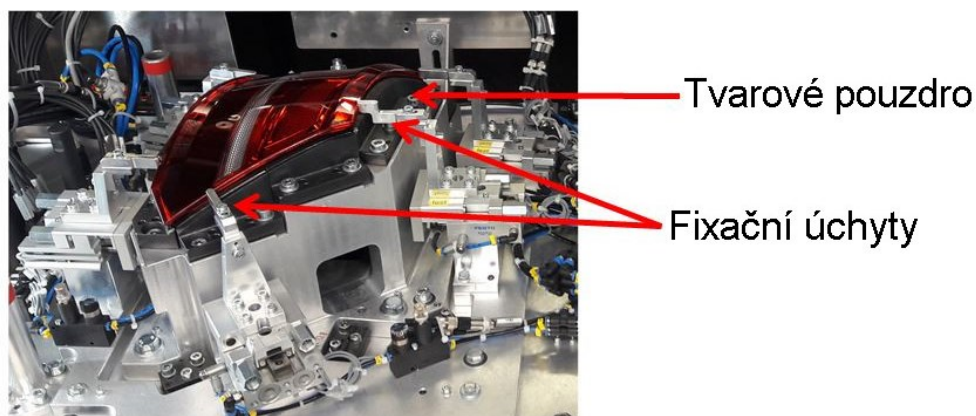
Celkový pohled do vibrační svářečky Branson GVX-3HR, viz. obrázek 19.



Obrázek 19 – Pohled do stroje

1.2.3. Dolní nástroj

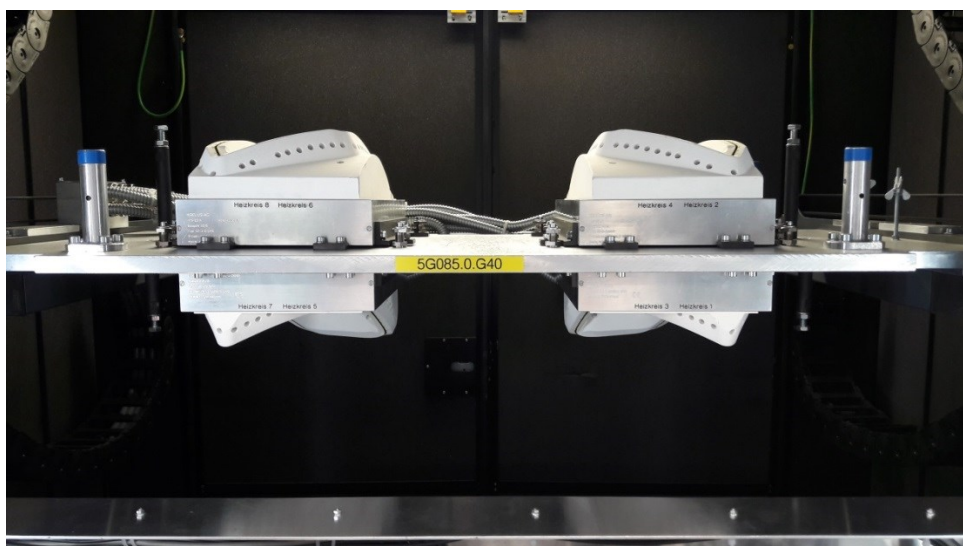
Spodní nástroj, viz. obrázek 20, má za úkol zajistit předem stanovený tlak při svařování na svařované součást. Pomocí tvarového pouzdra je uchyceno pouzdro svítilny a následně zajištěno fixačními úchyty, které jsou ovládané automaticky.



Obrázek 20 – Dolní nástroj

1.2.4. Infračervené zrcadlo

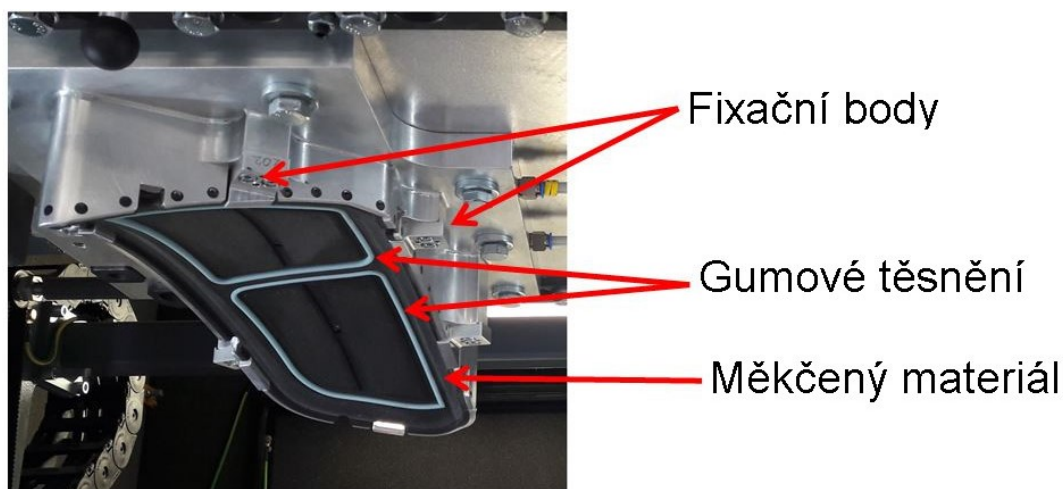
Infračervené zrcadlo, viz. obrázek 21, obstarává předehřátí svarového spoje před svařováním. Předehřívají se jak spodní tak horní díl zároveň. Forma nástroje je vyrobena z keramiky a po linii svaru je umístěná speciální folie, která vykonává samotné předehřívání spoje. Stroj disponuje nastavením, které dovoluje ovlivňovat dobu předehřevu a to jak prodloužit nebo zkrátit, tak úplně odstranit. Vzdálenost mezi infračerveným zrcadlem a svařovanými součástmi se pohybuje od 3 do 4 mm.



Obrázek 21 – Infračervené zrcadlo

1.2.5. Horní nástroj

V horním nástroji jsou vyvíjeny vibrace dle zadané amplitudy. Nástroj disponuje vakuovým úchopem, který je obklopen gumovým těsněním kvůli dobrému přidržení při svařování.



Obrázek 22 – Horní nástroj

Na nástroj je připevněný měkčený materiál, který brání poškrábání či jinému poškození materiálu PMMA při svařování. Aby nedocházelo k vychýlení svařované součásti z dané polohy, je nástroj opatřen fixačními body, viz. obrázek 22.

1.3. Svařovací parametry

V tabulce 2 jsou uvedeny svařovací parametry použité při výrobě vzorků.

Tabulka 2 – Svařovací parametry

Série vzorků	Parametry				
	Tlak [daN]	Amplituda [mm]	Frekvence [Hz]	Čas předehřevu [s]	Hloubka [mm]
1	600	1.1	227.28	6	1.2
2	600	1.4	227.28	6	1.2
3	600	0.8	227.28	6	1.2
4	600	1.1	227.28	20	1.2
5	600	1.1	227.28	0	1.2

2. Testování vzorků

Kompletní testování proběhlo ve společnosti HELLA AUTOTECHNIK NOVA s.r.o.. Testování probíhalo v pořadí: zkouška těsnosti, destruktivní zkouška vnitřním přetlakem, makroskopická zkouška. Pro destruktivní zkoušku byly zhotoveny vždy tři páry vzorků, levá a pravá strana, při daných parametrech. Levá strana vzorků byla použita na zkoušku těsnosti a následně destruktivní zkoušce vnitřním přetlakem. Z pravých kusů byl vybrán jeden, který byl podroben zkoumání pod mikroskopem.

2.1. Zkouška těsnosti

Před destruktivní zkouškou byla každá svítilna podrobena zkoušce těsnosti. Pro provedení zkoušky je nutné na svítilnu připevnit speciální přípravek, který je navržen pro daný typ svítilny. Přípravek se na svítilnu připevňuje pomocí šroubů, které se uchytí do úchyťů pro montáž na automobil. Po připevnění přípravku je připojena hadička pro přívod tlakového vzduchu. Takto nachystaný vzorek je připraven na provedení zkoušky.

Vzorek je následně ponořen do skleněné nádrže s vodou a natlakovaný vzduchem, viz. obrázek 23. Tento krok je důležitý zejména kvůli vyloučení necelistvého svaření. Nesvařená část se projeví tak, že z nesvařeného místa uniká vhaněný vzduch. Tlak přiváděného vzduchu nesmí být příliš vysoký, aby nedošlo k destrukci. Zkouška se vyhodnocuje vizuálně.



Obrázek 23 – Zkouška těsnosti

2.2. Destruktivní zkouška vnitřním přetlakem

Destruktivní zkouška byla provedena v nerezové nádobě s víkem, aby bylo zamezeno zranění. Zkoušený vzorek se umístí společně s přípevněným přípravkem do této nádoby a přes připojenou hadici se přivádí tlakový vzduch. Přírůstek tlaku v čase přiváděného vzduchu je dlouhodobým zkoušením stanoven na 40 mBar/s a to z důvodu, aby zkušební přístroj chybně nevyhodnotil ukončení zkoušky. Toto může nastat v případě, pokud se svítilna tlakuje příliš rychle a tlak ve svítilně se vyrovnává, to znamená, že různě kolísá. Při tlakovém poklesu nad přednastavenou mez přístroj vyhodnotí konec testu, avšak k destrukci nedojde. Za nejslabší místo svítilny je považován svár, tudíž v tomto místě také vzorky nejčastěji praskají.

Tabulka 3 – Průměrné hodnoty destruktivní zkoušky vnitřním přetlakem

Série vzorků	Naměřený tlak vzduchu [mBar]			Průměrná hodnota [mBar]
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	
1	472	476	471	473
2	483	480	487	483
3	499	494	500	498
4	327	315	318	320
5	346	352	348	349

2.3. Výpočet hraničního tlaku

Pro ukázkou výpočtu hraničního tlaku, byla použita série vzorků se sníženou amplitudou na 0,8 mm.

Kriteriální hodnota:

$$\sigma_{min} \geq 1MPa \quad (1)$$

$$\sigma_{min} \geq \frac{100N}{100mm^2} = \frac{100N}{cm^2} \quad (2)$$

Výpočet:

$$p_{lim} \geq Re \quad (3)$$

$$p_{lim} \geq \frac{F_{sv}}{S_{sv}} \quad (4)$$

$$F_{sv} = p_{lim} * S_{sv} \quad (5)$$

$$F_{sv}[N] = \frac{100N}{cm^2} * S_{sv}[cm^2] \quad (6)$$

$$S_{sv} = l_{sv} * 2 * A \quad (7)$$

$$p_{lim} \geq \frac{\frac{100N}{cm^2} * l_{sv}[mm] * A[mm] * 2}{S_{ks}[mm^2]} = \frac{100 * l_{sv} * A * 2}{S_{ks}} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (8)$$

$$p_{lim} \geq \frac{1 * l_{sv} * A * 2}{S_{ks}} * 1000000[pa] \quad (9)$$

$$100pa = 1mBar \quad (10)$$

$$p_{lim} \geq \frac{\frac{1 * l_{sv} * A * 2}{S_{ks}} * 1000000}{100} [mBar] \quad (11)$$

$$p_{lim} \geq \frac{1 * 882,5 * 0,8 * 2}{41453,82} * 10000[mBar] \quad (12)$$

$$p_{lim} \geq 340,62mBar \quad (13)$$

Tabulka 4 – Vypočtené hodnoty hraničních tlaků

Amplituda [mm]	p_{lim} [mBar]
0.8	340.62
1.1	468.35
1.4	596.08

2.4. Výpočet síly působící na svár

Pro ukázkou výpočtů byly použity parametry svařování pro první sérii vzorků.

$$Re \geq 1MPa \quad (1)$$

$$Re \geq \frac{1N}{100mm^2} \quad (2)$$

$$S_{sv} = l_{sv} * 2 * A \quad (3)$$

$$Re = \frac{P_n * S_{ks}}{S_{sv}} \quad (4)$$

$$100pa = 1mBar \quad (5)$$

$$Re = \frac{P_n[mBar] * S_{ks}[m^2]}{l_{sv}[mm] * A[mm] * 2} \quad (6)$$

$$Re = \frac{473 * 0,04145382}{882,5 * 1,1 * 2} \quad (7)$$

$$Re = 1,01MPa \quad (8)$$

2.5. Makroskopická zkouška

Kapitola se zabývá odebíráním vzorků ze svítlny a další přípravou vzorků ke zkoumání mikroskopem.

2.5.1. Příprava vzorků

Prvním krokem při přípravě vzorků je samotné získání vzorků ze zadních svítilen. Na svítilně bylo provedeno naznačení a očíslování vzorků.



Obrázek 24 – Číselné umístění vzorků

Po označení daných míst se vzorky vyřezaly ruční multifunkční vibrační bruskou.

Po tomto vyřezání následuje hrubé obroušení vzorků pod vodou, aby se vzorky zbavily velkých otřepů způsobených při vyřezávání. Hrubé broušení bylo provedeno ručně na brusné karborundové folii o zrnitosti 220, za stálého přítoku vody.

Následně se vzorky umístily do kalíšků určených pro zalití do pryskyřice, tak aby řezy byly umístěny kolmo k ploše zkoumané mikroskopem. Tyto kalíšky byly ošetřeny silikonovou vrstvičkou, která usnadnila vyjmutí vzorků zalitých v pryskyřici.

Vzorky byly postupně zality do netransparentní dvousložkové pryskyřice Struers LevoCit a následně do transparentní dvousložkové pryskyřice Struers ClaroCit. Transparentní část zaručuje prostupnost světla nutného pro zkoumání vzorku, kdežto v netransparentní části se dobře zobrazí ostré hrany vzorku.

Leštění probíhalo na stroji Struers Tegramin – 20, v tabulce 6 jsou uvedeny hlavní technické parametry.

Tabulka 5 – Hlavní parametry stroje Struers Tegramin – 20 [13]

Technická data			-
Disk	Průměr		200 mm
	Rychlost		40 – 600 ot/min
	Výkon motoru kontinuální/max		370/555 W
Hlava	Rychlost		50 – 150 ot/min
	Síla přtlaku		5 – 50 N
	Výkon motoru		120 W
Úroveň hluku	Při volnoběhu ve vzdálenosti 1m od stroje	47 dBA	
	Leštění	54 dBA	
	Broušení	56 dBA	
Váha bez krytu	-	52,5 kg	



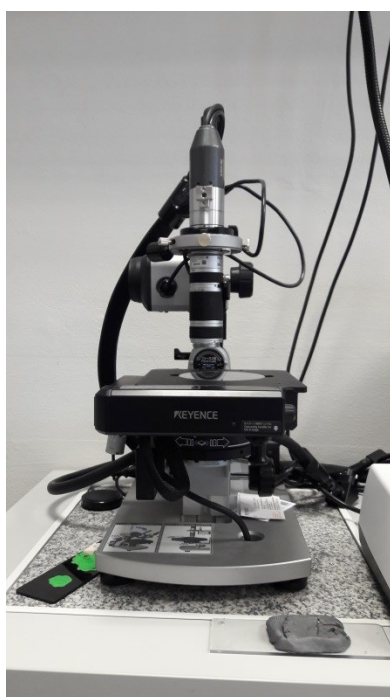
Obrázek 25 – Struers Tegramin – 20

Broušení bylo vždy sousměrné, tak aby co nejvěrněji napodobilo ruční broušení. Leštící proces se skládal z pěti po sobě jdoucích operací, viz. tabulka 7.

Tabulka 6 – Leštící operace

Operace	Zrnitost folie	Otáčky folie [ot/min]	Otáčky hlavy [ot/min]	Přítlak [N]	Čas broušení [min]	Přídavek
1	220	300	150	30	0:20	Voda
2	500	300	150	30	0:50	Voda
3	1000	300	150	30	1:30	Voda
4	2000	300	150	30	3:00	Voda
5	MD-Dac	150	150	25	3:00	Dia-Duo 2

Při páté operaci byly brusné folie nahrazeny leštícím plátnem Struers MD-Dac, který se používá pro leštění všech materiálů společně s diamantovými částicemi velikosti 9-3 μm . Zároveň byla použita diamantová suspenze Struers DiaDuo-2, která obsahuje jak diamantovou suspenzi, tak i chladicí smáčedlo. Jedná se o univerzální diamantovou suspenzi pro materiálografické jemné broušení a leštění.



Obrázek 26 - Mikroskop Keyence VHX-2000 s objektivem VH-Z20R/V (vlevo), připravený vzorek (vpravo)

Takto připravené vzorky se zkoumaly na mikroskopu Keyence VHX – 2000 s objektivem VH – Z20R/V, viz. obrázek 26. Jede o digitální mikroskop, který se vyznačuje vyšší ostroty a hloubkou obrazu než konvenční optické mikroskopy. Objektiv disponuje zvětšením 20x, 30x, 50x, 100x, 150x a 200x na patnácti palcovém monitoru [12].

2.6. Vyhodnocení destruktivní zkoušky tlakovým vzduchem

Z tabulky číslo 5 je viditelné, že v závislosti na amplitudě se mění i požadovaná mez pevnosti. Z tabulky je dále vyplývá, že při čtvrté sérii průměrná hodnota vzorků nedosáhla na požadovanou mez pevnosti, tudíž byla nevyhovující. Čtvrtá série byla svařována s prodlouženým časem předehřevu a to mělo za následek nekvalitní svarový spoj. Při předehřívání součásti došlo k destrukci tvaru pouzdra vlivem příliš vysokého času předehřevu, více je popsáno v následující kapitole.

Tabulka 7 – Vypočtené hodnoty síly

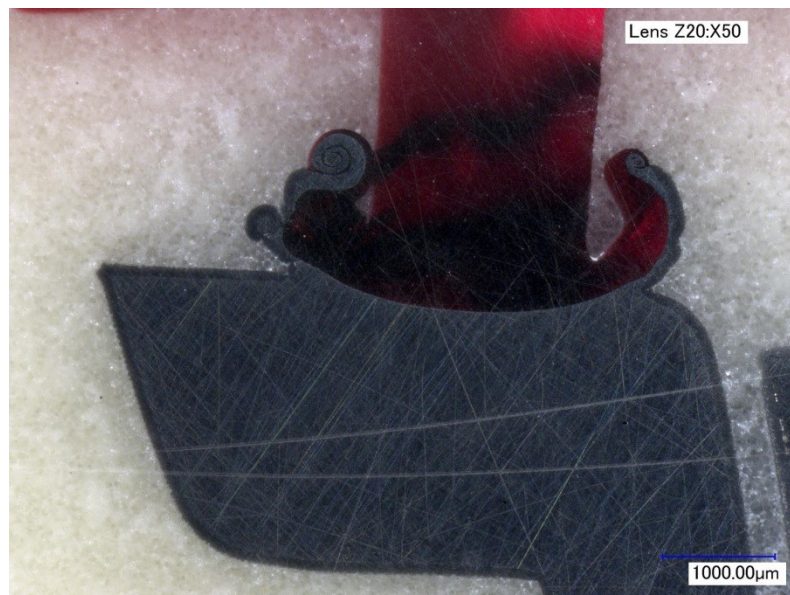
Série vzorků	Požadované Re [MPa]	Vypočtené Re [MPa]
1	0.71	1.01
2	0.56	0.81
3	0.98	1.46
4	0.71	0.68
5		0.75

2.7. Vyhodnocení makroskopických snímků

Pro mou práci byly vybrány vzorky z odebíraného místa číslo 2. Na těchto vzorcích je nejlépe viditelná změna jednotlivých parametrů. Zadní svítlna je na tomto místě ve svářečce podepřená a linie svaru je umístěna tak, že směr vibrací je rovnoběžný s touto linií. Velmi podobné chování svařovacího výronku je pozorováno i u vzorků číslo 1 a 3, avšak ne v takové míře.

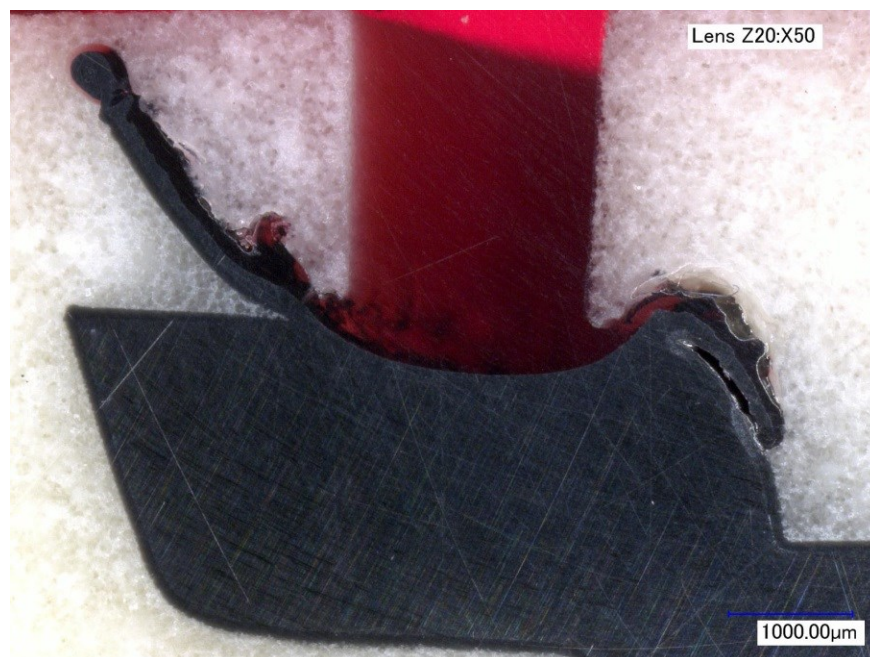
U vzorků odebíraných z míst číslo 4 a 5 nepozorujeme tak znatelné změny, naopak se svarový výronek stáčí směrem ke krycímu sklu. Je to způsobeno tím, že směr vibrací je kolmý na linii svaru.

Svařovací parametry u první série odpovídají běžně používaným parametrům při výrobě vybrané svítilny. Při těchto parametrech je dobře viditelné natavení obou svařovaných částí pouzdra z PC/ABS a krycího skla vyrobeného z PMMA. Na vnější straně, na obrázku vlevo, je viditelné spirálovité smísení výronku. Tento styl je viditelný, avšak v menší míře i z vnitřní strany svítilny. Vzhledově byl tento svar výronku vyhodnocen kladně. Vše je viditelné na obrázku 27.



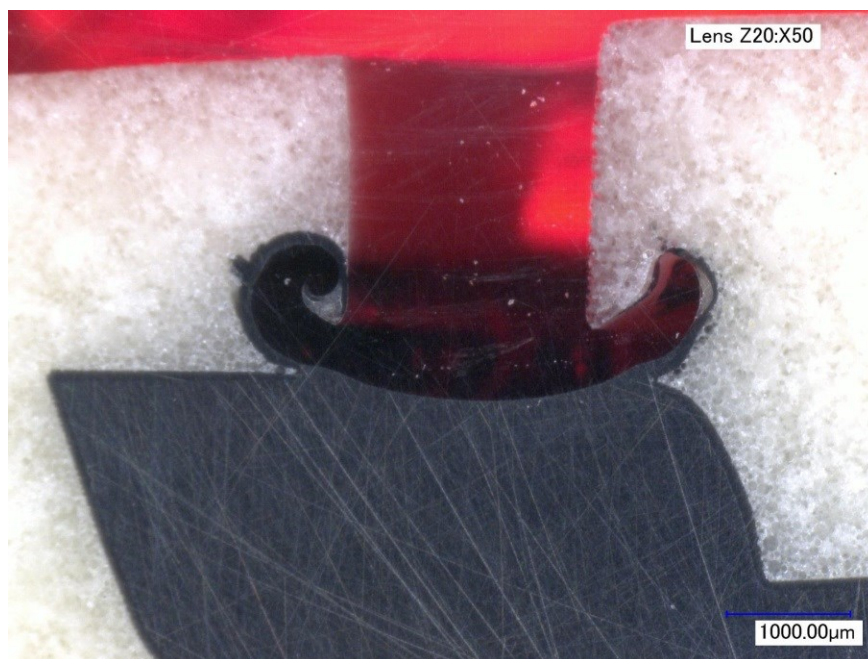
Obrázek 27 – Původní svařovací parametry

Při svařovacích parametrech druhé série byla zvýšena amplituda o 0,3 mm. Bylo zpozorováno natavení obou svařovaných částí. Při těchto svařovacích parametrech nedochází ke spirálovému smísení výronku a tavenina výronku je ze svařovaného spoje pouze vytlačována, viz. obrázek 28. Z vnější strany je tavenina vytlačena příliš daleko od spoje, což způsobuje nevzhledný tvar výronku při vnějším pohledu na svítilnu. Z estetického důvodu je svar nevyhovující.



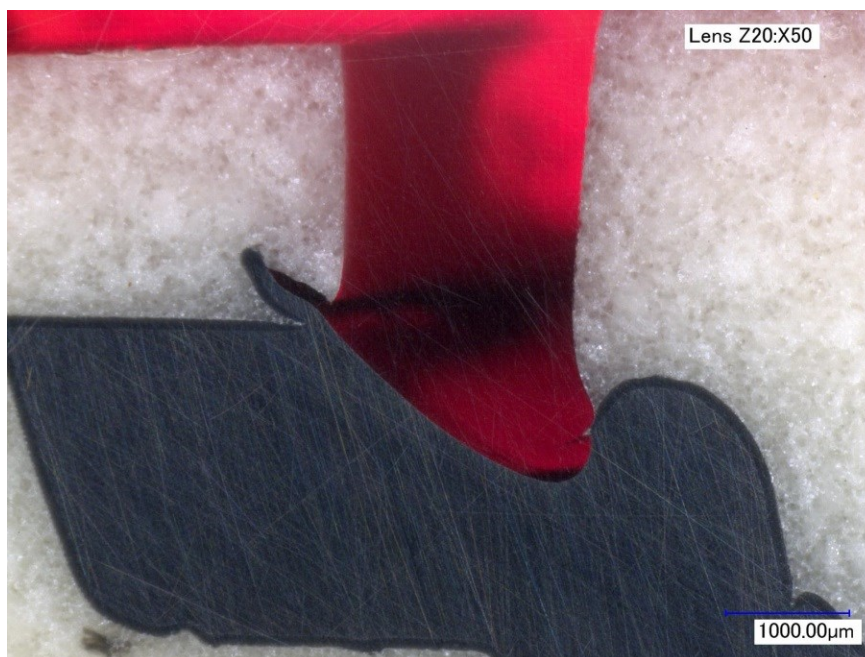
Obrázek 28 – Zvýšená amplituda

U třetí série byla amplituda snížena oproti standartní o 0,3 mm, tudíž amplituda byla nastavena na 0,8 mm. Při snížené amplitudě nedochází k razantnímu vytlačování taveniny ze svaru avšak nedochází k tak výrazné hloubce protavení, jak u předchozí série a ve výronku převažuje tavenina krycího skla. Ve výronku se spirálově nepromísily oba svařované materiály, viz. obrázek 29. Z estetického hlediska výronek vypadá velmi povedeně a při vnějším pohledu na svítilnu byl viditelný ucelený výronek po celém obvodu svítilny.



Obrázek 29 - Snížená amplituda

Při čtvrté sérii se amplituda opět nastavila na výchozí hodnotu, ale zvýšil se předehřev na 20 sekund. Toto razantní zvýšení předehřevu výrazně zkrátilo čas svařování. Z důvodu dlouhého předehřevu se obě svařované části zhroutily. U černého pouzdra došlo i ke změně tvaru. Při svařování takřka nedošlo k tvorbě výronku, protože nedocházelo k dostatečnému tření mezi oběmi součástmi, viz. obrázek 30. Z tohoto důvodu svařované součásti do sebe pouze zaklesly. Svítilna měla naprosto nevyhovující tvar svaru.



Obrázek 30 - Zvýšený předehřev

Poslední, pátá, série měla předehřev úplně odstraněn. Odstranění předehřevu mělo za následek delší dobu svařování. Při svařování nedošlo k výraznému protavení obou svařovaných částí. Vytvořil se nepříliš vzhledný výronek, který není ucelený a nachází se na něm množství otřepů. U výronku nedošlo ani ke spirálovitému tvoření a při tvorbě se výronek dostal příliš blízko ke krycímu sklu, viz. obrázek 31. Při pohledu na celou svítilnu byl výronek nevyhovující.



Obrázek 31 - Odstranění předehřevu

Závěr

Bakalářská práce se zabývala technologií vibračního svařování s infračerveným předehřevem, která se hojně využívá pro spojování termoplastů v automobilovém průmyslu, ale zejména pro výrobu směrových a zadních skupinových světlometů. Jako vzorky pro experiment byly zvoleny díly používané pro sériovou výrobu, což je dobrým předpokladem pro získání výsledků aplikovatelných v technické praxi.

Cílem práce bylo zhodnocení svařovacích parametrů na tvorbu svařovacího výrobku a pevnost samotného svarového spoje. Mezi krycím sklem vyrobeným z Polymethylmetakrylátu a pouzdem vyrobeným z Polykarbonátu/Akrylonitril-Butadien-Styrenu. Experiment byl rozdělen na dvě části, z nichž první se věnovala vlivu parametrů na tvar svarového výrobku a druhá na zjištění meze pevnosti svarového spoje. V první části experimentu bylo zjištěno, že požadované meze pevnosti nedosáhly pouze vzorky čtvrté série. Tyto vzorky měly upravenou dobu náhřevu a to tak, že byla zvýšena na dobu dvacet sekund. Takto razantní zvýšení náhřevu oproti obvyklým šesti sekundám mělo za následek i destrukci tvaru pouzdra z Polykarbonátu/Akrylonitril-Butadien-Styrenu.

Pro druhou část experimentu byly k porovnání vybrány vzorky z druhého odběrového místa, kvůli jejich nejrozdílnějšímu chování svařovacího výrobku. Toto chování bylo způsobeno tím, že při svařování je v tomto místě svítilna podepřená ve svářečce a směr vibrací je rovnoběžný s linií svaru. Bylo zjištěno, že při svařování se základními parametry byl svařovací výronek spirálově smísen a bylo dobře viditelné natavení obou součástí. Vzhledově byl tento svár vyhodnocen kladně. Při svařovacích parametrech se zvýšenou amplitudou nedocházelo ke spirálovému mísení výrobků obou součástí a tavenina je ze svarového spoje příliš vytlačována. Ve třetí sérii vyráběných vzorků byla amplituda snížena oproti standardnímu nastavení. Při tomto nastavení se tavenina tolik nevytlačovala z místa svaru. Čtvrtá série měla amplitudu opět nastavenou na výchozí hodnotu a předehřev zvýšen na dvacet sekund oproti standardním šesti sekundám. Tento parametr měl za následek degradaci tvaru a nedokonalé svaření. Poslední série svařovacích parametrů měla odstraněný předehřev. Odstranění předehřevu zvýšilo čas svařování a nedošlo k dokonalému provaření obou svařovaných součástí.

Výsledky bakalářské práce se již využívají při zdokonalování výroby. Vzhledem k rozsahu práce by bylo vhodné prozkoumat chování na více vzorcích.

Seznam použité literatury

- [1] TROUGHTON, Michael John. *Handbook of plastics joining: a practical guide* [online]. 2nd ed. Cambridge, UK: TWI/The Welding Institute, c2008 [cit. 2016-11-19]. ISBN 978-0-8155-1581-4.
- [2] *DSM Vibration Welding Guide* [online]. 2011 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: https://www.dsm.com/content/dam/dsm/arnite/en_US/documents/5037_DSM_Vibration_Welding_Guide_def.pdf
- [3] SOVA, Miloš. Termoplasty v praxi: praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů. Praha: Dashöfer, 1999. ISBN 80-86229-15-7
- [4] PMMA – polymethylmetakrylát. *RESINEX* [online]. [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pmma.html>
- [5] Lineárne vibračné zvarovanie: Technológia. *BRANSON* [online]. 2007 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <https://www.branson.eu/produkty/vibracne-zvaranie/linearne-vibracne-zvaranie/technologie>
- [6] Orbitálne vibračné zvarovanie: Technológia. *BRANSON* [online]. 2007 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <https://www.branson.eu/produkty/vibracne-zvaranie/orbitalne-vibracne-zvaranie/technologie>
- [7] VESELÝ, Karel. *Polymery: struktura, syntézy, vlastnosti, zpracování*. Brno: ČSPCH, 1992. ISBN 80-020-0951-7.
- [8] PMMA. *Plastic Systems s.r.o.* [online]. [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/PMMA/>
- [9] Vibrační svářečka GVX-3HR: Návod k provozu. Dietzenbach: Branson, 2015.
- [10] PC/ABS - polykarbonát/akrylonitril-butadién-styrén. *RESINEX* [online]. [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pc-abs.html>
- [11] Flame Retardant PC/ABS. *UNIC GROUP* [online]. [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: http://www.unicgroup.com/_en/02_product/03_product_detail.php?mid=36
- [12] VH-Z20R. *KEYENCE* [online]. 2017 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.keyence.com/products/microscope/digital-microscope/vhx-700f/models/vh-z20r/index.jsp>
- [13] *Struers: Tegramin* [online]. Denmark, 2017 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.struers.com/-/media/Library/Brochures/English/Tegramin.pdf>

- [14] Branson Gvx-3HR. *EMERSON* [online]. 2017 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.emerson.com/catalog/en-us/automation-solutions/precision-welding-cleaning/branson-gvx-3hr-clean-vibration-technology-welder>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Molekulární difuze [2]	13
Obrázek 2 - Svařitelnost termoplastů [2]	14
Obrázek 3 – Struktura PC/ABS [10]	16
Obrázek 4 – Průběh svařování horkým nástrojem [1].....	17
Obrázek 5 – Ultrazvukové svařování za použití koncentrátoru energie [1]	19
Obrázek 6 – Fáze ultrazvukového svařování [1]	19
Obrázek 7 – Tvorba spoje [2]	20
Obrázek 8 – Průběh etap svařování [2]	20
Obrázek 9 – Amplituda [2].....	22
Obrázek 10 – Schéma lineárního svařování [5].....	23
Obrázek 11 – Schéma orbitálního svařování [6].....	24
Obrázek 12 – Tupý spoj [2]	25
Obrázek 13 – Tupý spoj s U drážkou [2]	25
Obrázek 14 – Spoj pero s U drážkou [2]	26
Obrázek 15 – Spoj dojité pero s U drážkou [2]	26
Obrázek 16 – Šikmá svarová rovina [2].....	27
Obrázek 17 – Vzorek zadní svítilny	28
Obrázek 18 – Vibrační svářečka Branson GVX-3HR [16].....	29
Obrázek 19 – Pohled do stroje.....	31
Obrázek 20 – Dolní nástroj	31
Obrázek 21 – Infračervené zrcadlo	32
Obrázek 22 – Horní nástroj	32
Obrázek 23 – Zkouška těsnosti.....	34
Obrázek 24 – Číselné umístění vzorků	36
Obrázek 25 – Struers Tegamin – 20	37
Obrázek 26 - Mikroskop Keyence VHX-2000 s objektivem VH-Z20R/V (vlevo), připravený vzorek (vpravo)	38
Obrázek 27 – Původní svařovací parametry	40
Obrázek 28 – Zvýšená amplituda.....	40
Obrázek 29 - Snížená amplituda.....	41
Obrázek 30 - Zvýšený předehřev	42
Obrázek 31 - Odstranění předehřevu.....	42

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Technické údaje stroje [9].....	29
Tabulka 2 – Svařovací parametry	33
Tabulka 3 – Průměrné hodnoty destruktivní zkoušky vnitřním přetlakem	34
Tabulka 4 – Vypočtené hodnoty hraničních tlaků	35
Tabulka 5 – Hlavní parametry stroje Struers Tegamin – 20 [13].....	37
Tabulka 6 – Leštící operace	38
Tabulka 7 – Vypočtené hodnoty síly.....	39